

液晶対流系における欠陥乱流 —その発生機構と統計的性質—

九工大・工 那須野 悟、 甲斐 昌一

1. はじめに

トポロジ的欠陥が重要な役割を果たしていると考えられる乱流現象は、様々な非平衡開放系においてみることが出来る。近年このような乱流状態は欠陥乱流と呼ばれ空間的に大きな広がりを持つ系での乱流の普遍的運動様式のひとつと考えられ注目を集めている。ここで取り上げる液晶の電気流体力学的対流系もこうした欠陥乱流を示す典型的な系のひとつである。

ネマティック液晶の薄膜に外部電場を印加すると、ある閾値電圧 V_c 以上で初期に一様であった系内に巨視的な秩序構造が生じる。印加電場の周波数がある閾値 f_c 以下であれば、一般にこの秩序構造は Williams domains (WD) とよばれる周期的ロール状構造をとることが知られている。印加電圧をさらに増すと、この周期パターン中に自発的に複数のトポロジ的欠陥が生成し、それらが複雑に系内を運動する fluctuating Williams domains (FWD) と呼ばれる弱い乱流状態が現れる。

このような欠陥乱流の本質を捉えるためには、(1) 欠陥乱流の発生機構を明らかにする、(2) 欠陥乱流状態の統計的性質を探る、ことが重要な課題である。以下では、これらの問題に対する実験的アプローチについて述べる。

2. 空間的周期構造の安定性と欠陥乱流の発生機構

我々は、(1) の問題に対するアプローチ第一歩として、様々な周期をもつ WD に対して、それらがどのような条件下で、どの様なタイプの擾乱に対して不安定化するかを実験的に調べた [1]。

実験は、最初に任意の波数 k をもつロール状対流パターンを用意しその後のパターンの時間発展からその安定性を調べるという方法で行なった。実験に用いたネマティック液晶 (MBBA) 層のサイズは、厚さ $d = 25\mu\text{m}$ 、アスペクト比 $10^3 \times 10^3$ である。実験方法の詳細に関しては文献 [1] を参照していただきたい。

図 1 に印加周波数 $f = 0.5f_c$ ($f_c = 1350\text{Hz}$) のときに得られたノーマル・ロール構造 (ロール軸が初期配向方向に対し垂直方向に向いたもの) の安定性に関する相図を示す。横軸はロール状パターンの波数、縦軸はスケールされた印加電圧 ($\epsilon \equiv (V^2 - V_c^2)/V_c^2$) を表す。点線及び実線は、それぞれ、以下に述べるような観測結果に基づき決定された”一様状態の不安定化境界”および”ノーマル・ロールの不安定化境界”である [2]: (1) 初期値を点線より下の領域にとると、初期対流モードは急速に減衰していき、最

終的には、 $\epsilon < 0$ のときは完全にパターンは消滅し、また、 $\epsilon > 0$ のときには安定な波数をもつ新たなパターンが再形成される。この減衰は、初期モード自身が負の成長率をもつことに起因し、したがって、点線は、線形安定解析により得られる一様状態の安定限界すなわち対流開始の境界線に対応する。

(2) 初期値を点線より上側かつ実線で囲まれた領域の外側にとると、初期パターンは長波長の擾乱に対して不安定となり変形を生ずる。図2に観測された典型的な変形の例を示す。これらの変形は何れも、不安定モードの成長に起因するもので、その不安定化モードの波数ベクトル \vec{k}_u の向きにより、Eckhaus不安定($\vec{k}_{initial} \parallel \vec{k}_u$: 図2(a))、zigzag不安定($\vec{k}_{initial} \perp \vec{k}_u$: 図2(b))、skewed varicose不安定(前記以外: 図2(c))と分類できる[3]。

(3) 初期値を実線で囲まれた領域内に選ぶと、初期パターンのままでいるか、あるいは変化するにしても欠陥の運動等によるゆっくりとした変化となる。この場合には、先の二つの例のような急速なモードの時間発展は見られず、初期値は線形安定であると期待される。

以上の結果をもとにWDからFWDへの転移を議論しよう。周波数を固定して ϵ を上げていくと、系は一般には、欠陥の運動等の波数ベクトルの選択機構によって、安定領域内の点線 k_0 で示されている状態を選択していく。図1から、この最適状態の枝 k_0 は、 $\epsilon_c \approx 0.19$ でzig-zag擾乱に対して不安定となることがわかる。図1のような安定性ダイアグラムは、基本的には、周期的ロール状対流構造が不安定化した後のことについては何等の情報も与えるものではないが、観測によれば、 k_0 がその安定性を失うと同時に、系はWDからFWDへと転移するようである。従って、今の場合には、zig-zag不安定が、欠陥乱流への転移に重要な役割を果たしていると考えられる。

3. 欠陥乱流の統計的性質

欠陥乱流状態では、欠陥は不規則に生成・消滅を繰り返しながら系内を動きまわっている。このため、欠陥の個数はある平均値のまわりを不規則に変動する。この欠陥個数の変動は、欠陥乱流への転移点近傍では $1/f$ 的であることが報告されている[4]。(局所的な運動に関しても $1/f$ 的振舞いが観測されている[5]。)欠陥乱流への転移点からさらに印加電圧を上げていくと欠陥の時間変動はホワイト・ノイズ的なものに遷移していく。また、欠陥の平均数は欠陥乱流への転移点からはなれるにつれて増加していく。

ところで、図1によれば最適ロール状態 k_0 が不安定化した後もまだしばらくは(線形)安定な波数領域が存在しているということは興味深い。不安定化点近傍で系が示す $1/f$ 的振舞いと何か関係があるのだろうか?この問題に答えるにはまだ多くの研究が必要であろう。

参考文献

- [1] S. Nasuno and S. Kai, preprint (1990).
- [2] 最近、図1と類似の相図が mean flow 効果を取り入れた異方性対流モデル系を用いて得られている: S. Sasa, Prog.Theor.Phys.**83**, 824 (1990).
- [3] F. H. Busse and R. M. Clever, J.Fluid Mech.**91**, 319 (1979).
- [4] S. Kai, N. Chizumi and M. Kohno, J.Phys.Soc.Jpn.**58**,3541 (1989).
- [5] S. Nasuno and M. Sano, unpublished; 那須野悟、博士論文(1990).

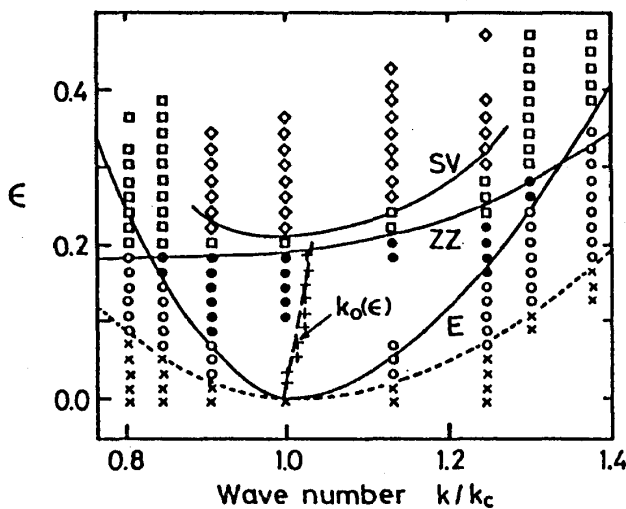


図1 液晶対流系のノーマル・ロールの安定性ダイアグラム ($f = 0.5f_c$)。実線は実験により決定されたノーマル・ロールの不安定化境界であり、それぞれ Eckhaus(E)、Zigzag(ZZ)、Skewed varicose(SV) 不安定化境界を表す。実線に囲まれた領域内では、ノーマル・ロールは安定である。点線は実験的に決定された対流開始に関する中立安定境界をあらわす。また、波線 $k_0(\epsilon)$ は、各 ϵ においてパターン選択機構によって選択される最適波数を表す。

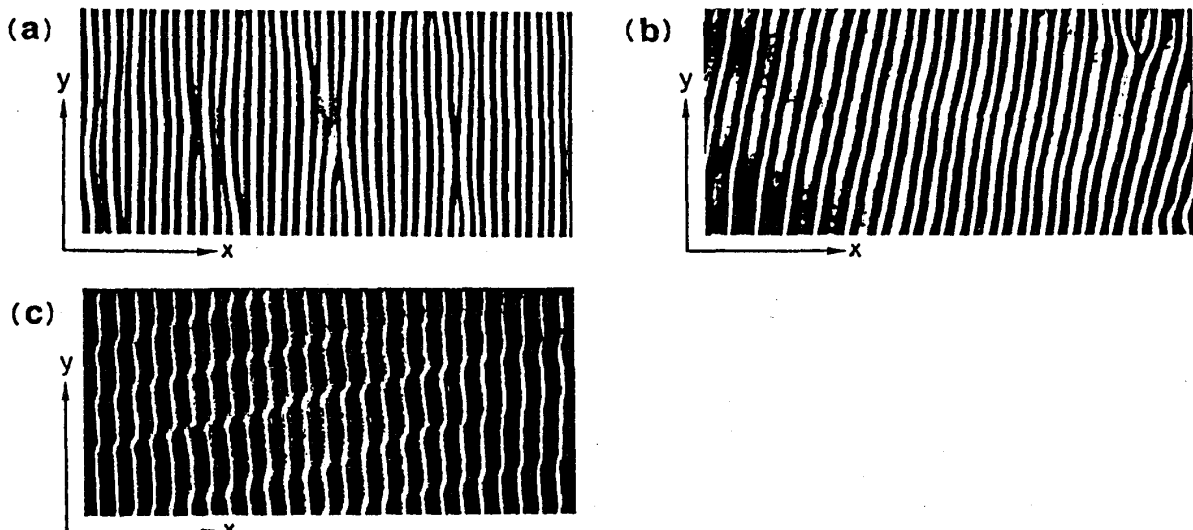


図2 長波長不安定により現れる変形パターンの例。(a)Eckhaus 不安定、(b)Zigzag 不安定、(c)Skewed varicose 不安定。